



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Selezione del materiale per una girante

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Selezione del materiale per una girante / G.Zonfrillo; R.Gatti; I.Giovannetti. - ELETTRONICO. - Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni:(2007), pp. 0-0. (Intervento presentato al convegno XXXVI Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni tenutosi a Ischia nel 4-8 settembre 2007).

Availability:

This version is available at: 2158/261664 since: 2015-12-21T09:43:13Z

Publisher:

AIAS

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

(Article begins on next page)

SELEZIONE DEL MATERIALE PER UNA GIRANTE

G.Zonfrillo^a, R.Gatti^a, I.Giovanetti^b

^a *Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze,
Via S.Marta, 3 - 50139 Firenze, e-mail: giovanni.zonfrillo@unifi.it*

^b *GE Oil & Gas – Nuovo Pignone S.p.A., Via F.Matteucci, 2 - 50100 Firenze, e-mail:
iacopo.giovanetti@ge.com*

Parole chiave: selezione materiali, girante, criteri progettazione.

Sommario

Viene illustrata una procedura per selezionare i materiali più opportuni nella realizzazione di una generica girante. La metodologia è basata sul collegamento tra caratteristiche del materiale e requisiti progettuali del componente e comporta l'individuazione di vincoli e indici di merito, che esprimono la rispondenza del materiale alle prestazioni del componente. L'importanza relativa dei vari parametri viene stabilita con un metodo logico di tipo digitale, mentre la normalizzazione degli indici di merito viene effettuata sia in modo lineare, sia con funzioni di tipo logaritmico. In questo ultimo caso viene aggiunto un valore critico al di sotto del quale il valore dell'indice diventa negativo. La procedura è stata applicata a due diversi componenti: la girante di un compressore assiale e l'elica di una piccola imbarcazione.

Abstract

A new procedure for selecting the most suitable materials for a generic rotor is described. The method connects design requirements and material properties; in particular, it defines actual constraints together with a set of material parameters, performance indices, in order to optimise the component performance for a specific application. The relative weights of the indices defined have been determined by a digital logical approach. Index normalisation has been carried out by both linear and logarithmic functions; in the latter case, a critical value has been introduced so that the index becomes negative below it. The procedure has been applied to different components: the rotor of an axial compressor and the propeller of a boat.

Il materiale nella progettazione

Nella progettazione meccanica, la scelta del materiale riveste un ruolo di fondamentale importanza. Durante lo sviluppo di un qualsiasi elemento meccanico il progettista non deve trascurare l'enorme contributo che il materiale, se opportunamente selezionato, può apportare al risultato finale.

Tuttavia la scelta non è un'operazione d'immediata risoluzione. Il progettista si trova di fronte ad un nutrito numero di materiali e di processi diversi da analizzare. Il problema,

ancora non completamente risolto, nasce dal fatto che si deve giungere ad un compromesso che permetta di soddisfare sia le richieste riguardanti le specifiche funzionali, sia quelle del processo tecnologico, sia quelle economiche. L'importanza dell'argomento è testimoniata dalle numerose pubblicazioni presenti nella letteratura tecnica [1-12]: molti sono infatti i metodi proposti per effettuare la selezione del materiale per uno specifico prodotto. I principali presentano comunque degli aspetti simili [1-3].

La scelta del materiale presuppone una chiara conoscenza dei requisiti funzionali richiesti ad ogni componente e questo comporta il dover prendere in considerazione molti fattori, che possono spaziare dalle varie proprietà (meccaniche, fisiche, tecnologiche, ecc.) alle caratteristiche di resistenza, dal costo del materiale e del processo produttivo alle caratteristiche di smaltimento. La relativa importanza di questi parametri sarà dipendente dalla specifica applicazione in oggetto. In generale, non è infatti possibile ottenere valori ottimali per tutti gli aspetti e sono necessarie delle soluzioni di compromesso [4, 5], spesso determinate definendo delle criticità da associare ai vari fattori [6, 7].

Sono state proposte varie metodologie [8-10] che si basano su fondamenti matematici e statistici, ricorrono a strumenti propri della ricerca operativa o utilizzano sofisticati programmi software [11, 12] per ottenere il miglior accordo tra caratteristiche del materiale e specifiche di progetto.

Metodologia

Nel presente lavoro è illustrata una procedura per selezionare i materiali più opportuni per la realizzazione di un elemento rotante (girante), sottoposto principalmente a forza centrifuga. La strategia utilizzata fornisce uno strumento efficiente per la scelta del materiale nei primi stadi del processo di progettazione ed è costituita sostanzialmente da quattro fasi:

- la definizione dei collegamenti tra le caratteristiche del materiale e i requisiti progettuali e prestazionali del componente.
- La formulazione dei vincoli che il materiale deve rispettare per compiere la funzione desiderata, cioè delle caratteristiche del componente che non possono essere modificate e che definiscono i criteri di accettabilità perché un materiale sia considerato idoneo per il processo di selezione. Esempi di vincolo possono essere rappresentati dalla capacità del materiale a resistere a particolari ambienti corrosivi, ad operare ad un'elevata temperatura di esercizio, ecc.
- La formulazione di indici di merito, per misurare con quanta efficienza il materiale soddisfa e combina le varie richieste, spesso tra loro anche contrastanti. Questi rappresentano raggruppamenti di proprietà dei materiali che, quando ottimizzati, massimizzano certi aspetti delle prestazioni di un componente.
- La ricerca di una procedura per esplorare l'insieme delle soluzioni, identificando i materiali che soddisfano i vincoli e classificandoli in base alla loro rispondenza agli obiettivi progettuali. Le metodologie di selezione si possono diversificare sia in funzione della tipologia dello specifico componente sia a seconda che si stia considerando una revisione di un componente già esistente o la progettazione di un nuovo elemento.

Componente e requisiti funzionali

La girante è un organo meccanico presente nelle macchine (operatrici e motrici) che consente di effettuare trasformazioni di diverse forme di energia. È essenzialmente costituito da un mozzo centrale attorno al quale in direzione radiale è disposto simmetricamente un certo numero di pale. Data l'ampia gamma di macchine realizzate, le giranti possono avere geometrie e dimensioni molto diverse e sono impiegate nei più vari

settori, dall'aeronautico al marino, dall'industriale al domestico, dal civile al militare. Nonostante la vastità del campo di applicazione e della diversità dei particolari componenti, si possono estrapolare delle caratteristiche fondamentali, comuni a tutte le giranti.

Alcune tipologie sono espressamente disegnate per impiego ad alta temperatura e non saranno considerate nel seguito del lavoro, in quanto i dati raccolti sono relativi a temperatura ambiente. È ovvio che se si analizzano componenti che lavorano a valori più elevati, si deve estendere il procedimento includendo materiali i cui limiti di utilizzo siano congruenti con i valori di esercizio del componente. Inoltre, pur non perdendo in generalità, nel seguito non verrà considerato l'aspetto relativo alla resistenza alla corrosione.

Qualsiasi tipo di girante, come del resto ogni componente meccanico, per poter assolvere alla propria funzione deve prima di tutto essere in grado di sopportare le sollecitazioni che su di essa agiscono. Il requisito di resistenza è quindi fondamentale. In particolar modo, nel caso in esame, la sollecitazione di maggiore entità è dovuta soprattutto alla forza centrifuga. Per poter limitare tale carico, presupponendo che la velocità di rotazione sia determinata dalle specifiche funzionali, è opportuno che la massa del componente sia la più piccola possibile.

Inoltre, è necessario un adeguato valore di rigidità, affinché il componente non subisca eccessive deformazioni sotto carico, che possono portare anche a funzionamenti non corretti da un punto di vista fluidodinamico, riducendo e talvolta compromettendo la funzionalità della girante.

Un altro aspetto verso il quale è opportuno rivolgere l'attenzione è il comportamento dinamico in frequenza: durante il funzionamento i fenomeni di vibrazione non devono portare a condizioni pericolose per il componente.

È necessario considerare anche l'aspetto economico: le spese sono legate sia ai processi tecnologici adottati per la realizzazione della girante sia ai costi propri del materiale che costituisce l'elemento stesso. Si possono quindi includere tra i requisiti la lavorabilità e l'economicità.

Caratteristiche del materiale e indici di merito

Il passo successivo consiste nell'individuare quali proprietà del materiale sono collegate ai requisiti richiesti al componente. A seconda dei casi queste caratteristiche possono essere dei vincoli, condizioni cioè che inderogabilmente devono essere soddisfatte nel progetto, oppure indici di merito da ottimizzare.

Il primo requisito è la resistenza. Normalmente questo è collegato con il carico di rottura, ma essendo in questo caso la tensione dovuta alla forza centrifuga è opportuno considerare una resistenza specifica, cioè divisa per la densità del materiale. In questo modo si ottiene un'indicazione di rilievo circa la resistenza meccanica della girante, considerando anche l'influenza della massa sul valore della tensione.

Il primo indice che si è considerato è quindi il rapporto fra la tensione di rottura e la densità (σ_R/ρ). D'altra parte il termine *resistenza* si può legare ad altri parametri, che a seconda del materiale o delle condizioni di esercizio risultano più significativi del carico di rottura. Si è deciso quindi di considerare come indici di merito anche il rapporto tra il carico di snervamento e la densità (σ_y/ρ) e quello tra il limite di fatica e la densità (σ_f/ρ).

Questi parametri rappresentano tuttavia il comportamento di un componente se sottoposto ad una sollecitazione principalmente di trazione; qualora si presenti una sollecitazione di tipo flessionale, l'indice che meglio definisce questo stato è $\sigma_R^{2/3}/\rho$ [2].

Per i requisiti di rigidità e nello stesso tempo di leggerezza del componente è stato considerato come indice di merito il rapporto tra il modulo di Young e la densità (E/ρ).

Per il comportamento dinamico è stata considerata la pulsazione propria del sistema, collegata al parametro $E^{1/2}/\rho$, che è stato quindi assunto come indice del comportamento del

materiale alle vibrazioni.

Un discorso più ampio è richiesto per la lavorabilità ed il costo: questi requisiti infatti sono molto più difficilmente generalizzabili e necessariamente occorre fare delle semplificazioni. Si è pensato di scegliere come indice di merito la durezza (H) del materiale, collegata sia alla lavorabilità che al costo. Un più basso valore di durezza infatti favorisce la lavorabilità, sia per asportazione di truciolo che per deformazione plastica; una migliore lavorabilità fa diminuire i costi del processo di lavorazione. L'altro indicatore relativo al costo è rappresentato dal prezzo della materia prima: come indice di merito è stato considerato il prezzo a parità di volume di materiale (€).

Infine, essendo i dati riferiti a temperatura ambiente, è opportuno inserire un indice relativo alla massima temperatura di utilizzo (T_m), che dia in qualche modo un limite di validità delle caratteristiche del materiale e che indirettamente possa tener conto degli effetti che temperature leggermente più elevate rispetto a quella ambiente possono comportare. Il quadro completo degli indicatori considerati è riportato in tab. 1.

Tab. 1 - Indici di merito da ottimizzare

massimizzare							minimizzare	
σ_R/ρ	$\sigma_R^{2/3}/\rho$	σ_y/ρ	σ_f/ρ	E/ρ	$E^{1/2}/\rho$	T_m	H	€

Dati e criteri di selezione dei materiali

Nella ricerca dei materiali più opportuni è chiaramente utile considerarne il maggior numero possibile. Il primo passo è rappresentato quindi da una ricerca bibliografica. Questa è stata principalmente effettuata attraverso banche dati on-line, consultando articoli o cataloghi riguardanti le giranti, visionando siti web di vari fornitori di materiali. In particolare, la fonte principale dei dati utilizzati è rappresentata dal data base del sito www.matweb.com.

Tuttavia, già in questa fase è stato necessario compiere una prima scelta, non potendo chiaramente considerare i materiali nella loro totalità. È stato comunque selezionato un esteso insieme di materiali, raggruppati nei seguenti gruppi:

- acciai
- leghe di alluminio
- leghe di magnesio
- leghe di titanio
- plastici e compositi plastici
- compositi a matrice metallica
- ceramici
- altri.

Con il termine *altri* sono stati designati tutti quei materiali che non possono essere catalogati nelle altre classi: sono entrati in questo insieme materiali come il vanadio, il rame, il tungsteno, ecc.

Per quanto riguarda i plastici si è considerato solo i materiali con caratteristiche strutturali. Per i metalli è stato imposto un basso valore di soglia (diverso da classe a classe) sul carico di rottura, in modo da considerare solo le leghe con caratteristiche di resistenza più elevate. Inoltre sono stati esaminati solo compositi a fibre corte, per non entrare in dettagli riguardanti i processi tecnologici e non considerare materiali chiaramente anisotropi che avrebbero reso problematico il confronto con gli altri. Seguendo questi criteri, sono stati presi in considerazione circa 500 materiali, per ciascuno dei quali è necessario valutare il valore dei vari indici di merito. Per ridurre il lavoro (alcuni parametri, come ad esempio il costo, sono problematici da reperire) e scartare sin da questa fase i materiali chiaramente *peggiori*, si è pensato di effettuare una prima selezione sulla base di

solo tre proprietà: carico di rottura, modulo elastico e densità.

Riportando le prime due in funzione dell'ultima si ottengono le rappresentazioni mostrate in fig. 1 (σ_R/ρ) e in fig. 2 (E/ρ), nelle quali materiali sono stati divisi nelle classi definite in precedenza.

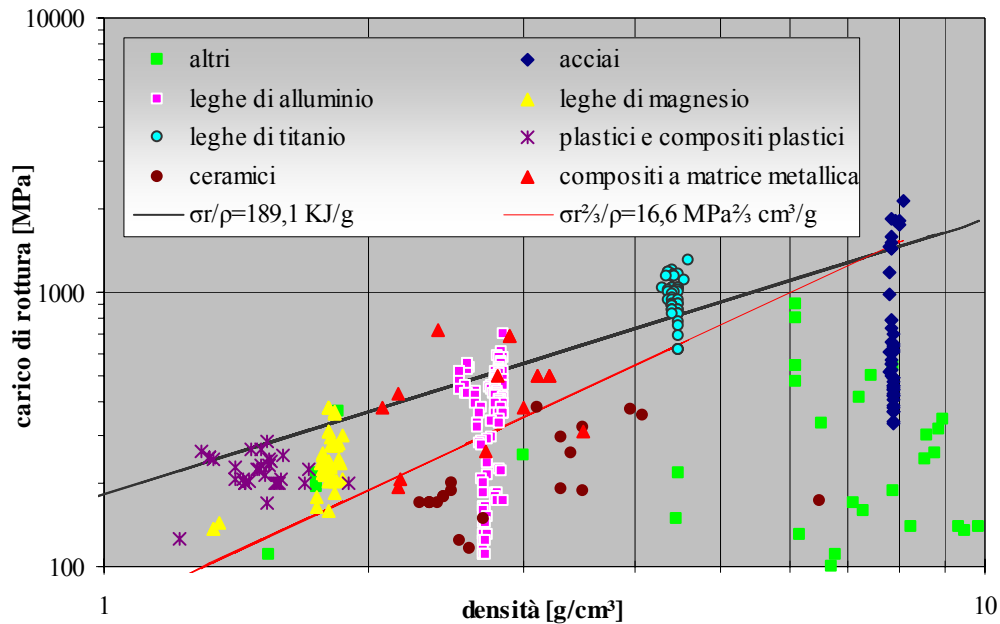


Fig. 1 – Carico di rottura in funzione della densità per i materiali selezionati

Da una prima analisi si nota che materiali raggruppati nella medesima classe presentano sostanzialmente la stessa densità a fronte di valori ben distinti di σ_R ed E ; questo è dovuto essenzialmente ai diversi trattamenti termici che ciascun materiale ha subito e agli elementi di lega (metalli), alle lavorazioni subite, alle differenti percentuali di fibre presenti nella matrice (compositi). Altre classi presentano valori completamente dispersi, come per esempio avviene per i ceramici e gli *altri*.

Su questi grafici è possibile riportare direttamente alcuni indici di merito. In particolare, in fig. 1 sono state tracciate due rette di pendenza diversa, corrispondenti rispettivamente a valori definiti dei due indici σ_R/ρ e $\sigma_R^{2/3}/\rho$. Punti che stanno sulla stessa retta hanno ugual valore dell'indice di merito e quindi corrispondono a materiali che presentano comportamenti simili riguardo alla caratteristica delineata dall'indice.

Posizionando opportunamente le rette è possibile fare una prima selezione, escludendo tutti i materiali che stanno al di sotto delle linee: questo equivale ad imporre un valore minimo ai due indici. La rappresentazione grafica aiuta a stabilire in maniera appropriata questi valori. Nel caso si stia considerando la revisione del progetto di un componente già esistente, i valori possono essere scelti con riferimento a quelli presentati dal materiale del componente. Nel presente caso sono stati scelti in modo da selezionare la maggior parte delle classi, visto che al momento non sono stati considerati gli altri indici di merito.

Analizzando i dati riportati in fig. 1, si possono escludere i materiali della classe *altri*: le loro proprietà sono nettamente inferiori rispetto ai limiti imposti per entrambi gli indici. Le stesse considerazioni possono essere fatte per i materiali ceramici, che inoltre sono fragili e comporterebbero molti problemi in fase di lavorazione.

Solo un esiguo numero di leghe di magnesio si posiziona sopra la retta relativa al primo indice, mentre sostanzialmente tutte superano quella relativa al secondo indice.

Considerazioni analoghe possono essere fatte per i materiali plastici. Rientrano infine nella selezione pure alcuni compositi a matrice metallica.

Non è però corretto effettuare la selezione solo sulla base di questi indici, non essendo il comportamento strutturale l'unico requisito, anche se è sicuramente di fondamentale importanza. Si è perciò convenuto di selezionare per ogni classe (escludendo i ceramici e la categoria *altri*) un certo numero di materiali (circa una decina), scegliendo quelli che risultano essere i più *performanti*. In altre parole è stata fatta, con riferimento a ciascun indice, un'operazione di unione degli insiemi contenenti i migliori materiali di ogni classe.

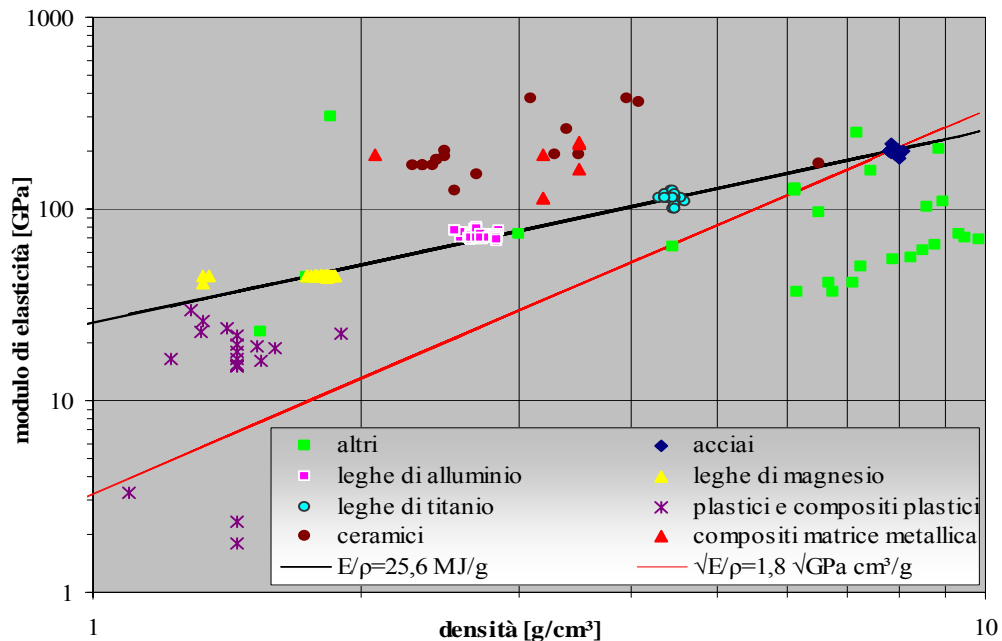


Fig. 2 – Modulo di elasticità in funzione della densità per i materiali selezionati

Analizzando la fig. 2 si nota che i dati relativi alle classi dei materiali metallici appaiono abbastanza raccolti; si ha inoltre una sostanziale proporzionalità fra il modulo elastico e la densità dei metalli: il rapporto E/ρ risulta così costante.

Anche in questo caso è stata tracciata una linea, posizionata in modo da intersecare buona parte delle classi presenti, per avere un livello di raffronto per la selezione. Una seconda retta, con diversa pendenza, rappresenta una condizione di selezione per quanto riguarda il comportamento del materiale alle vibrazioni (indice $E^{1/2}/\rho$), ed è stata posizionata in modo da non escludere gli acciai.

Procedendo, si nota però che utilizzando il primo indice soltanto i materiali plastici e gli *altri* verrebbero scartati. Il secondo indicatore porta ad escludere o nulla o intere classi di materiali. Da queste considerazioni si deduce che l'utilizzo di questi indici non è utile in questo caso come discriminante.

Sulla base delle considerazioni esposte è stata quindi effettuata una selezione, giungendo ad avere un insieme di circa 50 materiali, sostanzialmente costituito dai migliori materiali (in termini di rapporto resistenza-peso) di ogni classe.

Funzione obiettivo

Dopo aver delineato il legame tra il materiale, attraverso le sue caratteristiche, e le funzioni del componente, si pone il problema di come confrontare il profilo desiderato di proprietà

con quello dei materiali selezionati, per trovare il miglior accordo. Bisogna indicare delle priorità di progetto: è necessario definire l'importanza che ogni singolo indice di prestazione ha per l'applicazione considerata.

Molte volte questo viene fatto [2, 7, 13, 14], in funzione della specifica applicazione, attribuendo ai vari indici di merito un peso diverso e definendo una *funzione obiettivo*. Sulla base di questa i materiali vengono classificati per determinare quelli più indicati per la realizzazione del componente oggetto dello studio. La funzione obiettivo (FO) è ottenuta sommando i prodotti dei vari indici di merito (M_j), opportunamente adimensionalizzati (m_j), per i rispettivi pesi: $FO = \sum_j m_j \cdot w_j$ (il pedice j varia con gli indici di merito).

Numerose sono le metodologie proposte [4, 10, 15] per aiutare i progettisti nella scelta dei pesi e cercare di ridurre la soggettività insita in questa operazione. In questo lavoro è stato utilizzato un approccio logico di tipo digitale [13]. Per valutare l'importanza si confrontano solo due indici per volta decretando in ogni comparazione il più importante; all'indice che nel confronto risulta essere più rilevante sono assegnati 3 punti, mentre all'altro soltanto 1; nel caso in cui la criticità risulta essere paritaria, ciascun indicatore riceve 2 punti. Il peso w_j relativo ad ogni parametro è ottenuto dividendo il punteggio ricavato nei vari raffronti per la somma totale di tutti i punteggi. La somma di tutti i pesi risulta così essere unitaria.

Ovviamente i vari indicatori necessitano di essere adimensionalizzati per poter essere confrontati fra loro; nel presente studio sono stati utilizzati due diversi tipi di normalizzazione: lineare e non lineare. Nel primo caso il miglior valore dell'indice viene posto pari a 100 e gli altri scalati in proporzione ($m_i = 100 \cdot M_i / M_{\max}$ se si deve massimizzare l'indice, $m_i = 100 \cdot M_{\min} / M_i$ se si deve minimizzare). Nel secondo caso sono state utilizzate due diverse funzioni [13]:

$$m_i = \frac{-100}{\ln\left(\frac{M_c}{M_{\max} - M_c}\right)} \cdot \ln\left[\frac{(M_{\max} - 2M_c)}{M_c(M_{\max} - M_c)} \cdot M_i + \frac{M_c}{M_{\max} - M_c}\right] \quad (1)$$

$$m_i = \frac{-100}{\ln\left(\frac{M_{\min}}{M_c - M_{\min}}\right)} \cdot \ln\left[\frac{M_c^2 - (2M_c \cdot M_{\min})}{M_c - M_{\min}} \cdot \frac{1}{M_i} + \frac{M_{\min}}{M_c - M_{\min}}\right] \quad (2)$$

La (1) viene utilizzata nel caso in cui l'indice debba essere massimizzato, la (2) nel caso debba essere minimizzato; il pedice i varia con il materiale. Con queste definizioni m varia tra -100 e 100; M_c è un valore dell'indice di merito assegnato dal progettista e rappresenta il valore per cui il parametro normalizzato m è nullo. Materiali che hanno il valore dell'indice minore di M_c entreranno nella funzione obiettivo con un segno negativo.

Esempi applicativi

La procedura descritta è stata applicata a due componenti: la girante di un compressore assiale (revisione di un prodotto esistente) e l'elica di una piccola imbarcazione (nuovo progetto).

Girante di un compressore assiale. Il rotore oggetto dello studio costituisce la girante del primo stadio di un compressore assiale ed è realizzato in acciaio inossidabile AISI 422. La temperatura alla quale lavora è superiore a quella ambiente: per questo motivo si è imposto come vincolo $T_m > 100^\circ\text{C}$; materiali con valori inferiori a questo limite vengono direttamente scartati. In tab. 2 sono riportati i pesi assegnati ai vari indici di merito con il metodo descritto. Grande importanza assume il rapporto σ_R/ρ , immediatamente seguito da \sqrt{E}/ρ ; scarso peso invece, visto il tipo di applicazione, è assegnato al costo del materiale.

Tab. 2 – Criticità assegnate agli indici di merito per la girante di un compressore

indice	peso	punteggi																													
σ_R/ρ	0,167	3	3	3	3	3	3	3	3																						
$\sigma_R^{2/3}/\rho$	0,083	1								1	1	1	1	1	3	3															
σ_y/ρ	0,104		1							3							1	1	1	2	3	3									
σ_f/ρ	0,132			1							3						3					2	1	3	3	3					
E/ρ	0,104				1						3						3					2				1	3	1	1		
\sqrt{E}/ρ	0,153					1						3					3					3				3	3	3			
T_m	0,104						1						3					2					1			1		1	3	3	
H	0,083							1						1					1					1		3		1	1	3	
€	0,069								1						1				1					1			3		1	1	1

Il passo successivo consiste nell'adimensionalizzare gli indici; questo è stato fatto sia attraverso la funzione lineare sia attraverso quella non lineare. In questo ultimo caso, trattandosi di una revisione di progetto, i valori dei parametri M_c (uno per ciascun indice di merito) sono stati fissati con riferimento ai valori assunti dagli indici per il materiale con cui il componente in esame è costituito. Valutando la funzione obiettivo, si ottengono due distinte graduatorie finali: i primi otto materiali di entrambe sono riportati in fig. 3.

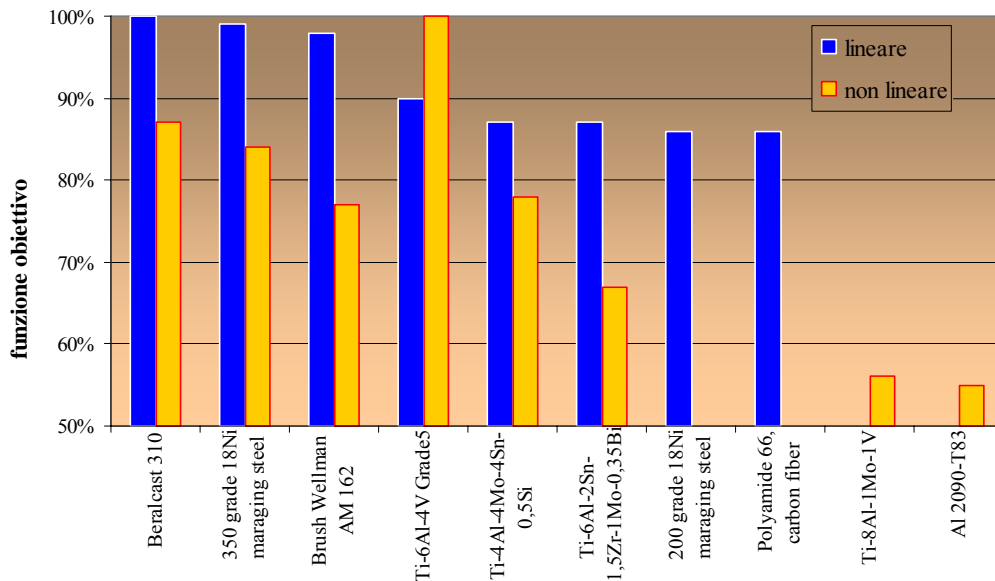


Fig. 3 – Funzione obiettivo, in termini percentuali, per i primi otto materiali.

Utilizzando la funzione lineare i migliori materiali risultano essere due compositi a matrice metallica Al-Be e un acciaio maraging, seguiti da alcune leghe di Ti; compaiono infine un secondo acciaio maraging e un composito plastico. I primi materiali sono presenti anche nella seconda graduatoria: il migliore risulta essere la lega Ti-6Al-4V grado 5, mentre tra gli ultimi due compare una lega di Al.

Considerando i primi sei piazzamenti le due graduatorie indicano gli stessi materiali, anche se con posizione relativa diversa; nel caso della normalizzazione non lineare si ha una maggiore differenziazione nei valori assunti dalla funzione obiettivo. Inoltre questa permette, attraverso i valori di M_c , di inserire nella procedura un livello di *accettabilità* o di *soddisfazione* per gli indici di merito. D'altra parte questo comporta una maggiore soggettività, influenzando inevitabilmente i risultati della selezione finale: due soggetti

diversi possono giungere con lo stesso metodo a differenti risultati.

Per valutare quanto il parametro M_c può essere determinante sono state fatte altre graduatorie utilizzando la normalizzazione non lineare e variando sistematicamente i valori di M_c . In particolare per ogni indice di merito il valore di M_c è stato fissato, con riferimento ai valori assunti dai vari materiali, pari a:

- valore minimo tra quelli presenti
- valore mediano tra il massimo e il minimo
- media dei valori presenti
- 70% del valore massimo (non è possibile fissare il valore massimo in quanto in questo caso il valore della FO risulta negativo per tutti i materiali).

I risultati in termini di graduatoria finale, considerando solo i primi sei piazzamenti, sono riportati in tab. 3.

Tab. 3 – Posizione relativa dei migliori materiali con una normalizzazione non lineare.

	M_c				
	materiale esistente	valore minimo	valore mediano	media aritmetica	70% valore massimo
materiale	posizione				
Ti-6Al-4V Grade 5	1	4	4	2	4
Beralcast 310	2	1	1	4	2
350 Grade 18Ni maraging steel	3	3	3	1	1
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0,5Si	4	5	6	3	5
Brush Wellman AM162	5	2	2	5	3
Ti-6Al-2Sn-1,5Zr-1Mo-0,35Bi	6	-	5	6	6
Polyamide 66, carbon fiber	-	6	-	-	-

Si può notare come, pur variando M_c in un ampio campo, i materiali più competitivi rimangono sostanzialmente gli stessi, anche se la loro posizione relativa si modifica.

Elica per imbarcazione. Come ulteriore esempio la metodologia è stata applicata all'elica di una piccola imbarcazione, considerando di scegliere il materiale per un nuovo progetto e non per una revisione come nell'esempio precedente.

L'ambiente in cui l'elica opera è quello marino, da cui deriva la necessità di selezionare un materiale in grado di resistere alla corrosione; tuttavia questo rappresenta un vincolo che può essere superato per mezzo di opportune verniciature o rivestimenti superficiali.

In questo caso si è ritenuto di non considerare come indice di merito la temperatura; inoltre nell'assegnare le criticità gli indici relativi alla resistenza meccanica sono stati conglobati in uno solo, per non dare eccessiva rilevanza a quest'aspetto. I pesi sono stati quindi attribuiti in due passi: il primo in cui compare un indice di merito *resistenza specifica* e un secondo in cui il peso assegnato a questo indice è stato diviso tra i quattro parametri del materiale che lo caratterizzano, sempre sulla base dei confronti fra due singoli indici (tab. 4). Rispetto al caso precedente il parametro ϵ assume maggiore rilevanza.

Per effettuare la normalizzazione non lineare sono stati utilizzati i valori riportati nell'ultima colonna in tab. 4, considerati come assegnati del progettista. A seguito di tali considerazioni si è giunti alla definizione delle due graduatorie finali riportate in fig. 4.

In entrambe le graduatorie compaiono leghe di Al, acciai e compositi plastici. Le prime prevalgono con la normalizzazione lineare, in cui il materiale più opportuno risulta essere la lega Al 2090-T83; nel secondo caso risultano più competitivi i compositi plastici (il materiale migliore è una poliammide rinforzata con fibre di carbonio), a scapito degli acciai. Solo cinque materiali compaiono in entrambe le graduatorie e, similmente a quanto avviene nel caso del compressore, con la normalizzazione di tipo logaritmico si ha una maggiore escursione dei valori assunti dalla funzione obiettivo.

Tab. 4 – Criticità assegnate agli indici di merito per l'elica di un'imbarcazione

indici di merito	peso	punteggi										M_c
E/ρ	0,200	3	3	1	1							20 MJ/g
\sqrt{E}/ρ	0,125	1				2	1	1				$2 \sqrt{\text{GPa cm}^3/\text{g}}$
H	0,125		1			2			1	1		40 HRC
ϵ	0,275			3			3		3		2	100 €/dm ³
resistenza specifica	0,275				3			3		3	2	
σ_R/ρ	0,092	3	2	3								180 KJ/g
$\sigma_R^{2/3}/\rho$	0,057	1			1	3						$20\text{MPa}^{2/3}\text{cm}^3/\text{g}$
σ_y/ρ	0,092		2		3		3					150 KJ/g
σ_f/ρ	0,034			1		1	1					40 KJ/g

Anche in questo caso cambiando i valori di M_c nel modo già descritto i primi 8 materiali indicati sostanzialmente non si modificano, pur variando (in qualche caso anche sensibilmente) l'ordine con cui compaiono nella graduatoria.

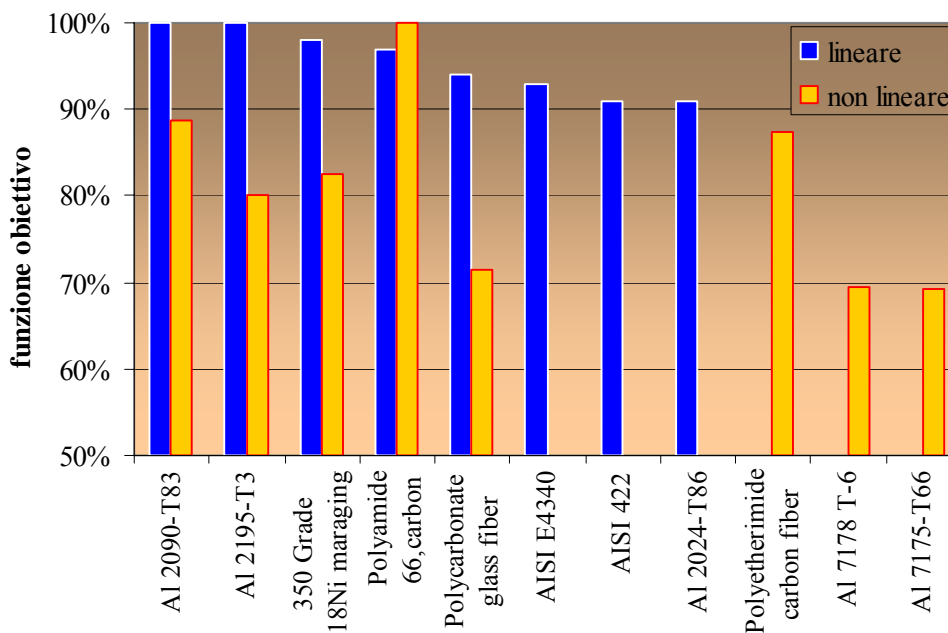


Fig. 4 – Funzione obiettivo in termini percentuali per l'elica di imbarcazione

Conclusioni

È stato descritto ed utilizzato un metodo per la selezione del materiale per la realizzazione di una generica girante; il procedimento si basa principalmente sull'associazione dei requisiti con le caratteristiche dei materiali, la definizione di vincoli e indici di merito.

Per attribuire a ciascun parametro l'importanza assunta di volta in volta a seconda dell'applicazione considerata, si è utilizzato un approccio logico di tipo digitale, che risulta di semplice e immediata applicazione e porta alla definizione numerica delle criticità solo sulla base di considerazioni qualitative. Questo riduce la soggettività insita nell'operazione e risulta di grande aiuto soprattutto quando gli indici di merito sono numerosi.

Per adimensionalizzare i dati dei materiali è stata utilizzata, oltre all'usuale funzione lineare, anche una formulazione di tipo logaritmico; questo comporta un effetto di

saturazione che riduce l'influenza sulla graduatoria finale di possibili valori estremi (molto alti o molto bassi) in alcuni indici di merito. Inoltre la possibilità di ottenere valori negativi della funzione obiettivo introduce un livello di accettabilità nella graduatoria dei materiali.

La presenza del parametro M_c valorizza il ruolo del progettista nel processo di selezione, che ha in questo modo una possibilità per esprimere un livello di *soddisfazione* nei valori delle proprietà dei materiali. Nel caso della revisione di un progetto esistente possono essere adottati i valori del materiale già utilizzato per il componente, in modo da avere un confronto immediato; nel caso di nuovi progetti si può ricorrere a valori di materiali utilizzati per componenti simili o questi possono essere introdotti direttamente dal progettista.

Questo aumenta la soggettività della metodologia, anche se comunque le scelte fatte rimangono chiaramente documentate e modificabili senza particolari problemi. Gli esempi riportati hanno inoltre mostrato che, variando M_c in un ampio campo, i materiali più idonei rimangono sostanzialmente gli stessi, anche se la loro posizione relativa nella graduatoria si modifica. Nel caso in cui il metodo venga utilizzato nei primi stadi del processo di progettazione, la scelta dei valori di M_c non influenza quindi significativamente il risultato finale, che sostanzialmente è quello di dare delle indicazioni di massima sui materiali da prendere in considerazione nelle successive fasi di sviluppo del progetto.

Bibliografia

- [1] J.A.Charles, F.A.A.Crane, J.A.G.Furness: *Selection and use of engineering materials*, Butterworth-Heinemann, Oxford (1997).
- [2] M.F.Ashby: *Materials selection in mechanical design*, Butterworth-Heinemann, Oxford (1999).
- [3] P.Mangonon: *The principles of materials selection for engineering design*, Prentice Hall (1999).
- [4] M.F.Ashby, Y.J.M.Br chet, D.Cebon, L.Salvo: *Selection strategies for materials and processes*, Materials and Design, vol.25, n.1, pp.51-67 (2004).
- [5] P.Sirisalee, M.F.Ashby, G.T.Parks, P.J.Clarkson: *Multi-criteria material selection in engineering design*, Advanced Engineering Materials vol.6, n.1-2, pp.84-92 (2004).
- [6] M.F.Ashby: *Multi-objective optimization in material design and selection*, Acta Materialia, vol.48, no.1, pp.59-367 (2000).
- [7] M.Farag: *Materials selection for engineering design*, Prentice Hall, New York (1997).
- [8] Y.Brechet, D.Bassetti, D.Landru, L.Salvo: *Challenges in materials and process selection*, Progress in Materials Science, vol.46, n.3-4, pp.407-428 (2001).
- [9] Y.Sawaragi, H.Nakayama: *Theory of multi-objective optimisation*, Academic Press, New York (1997).
- [10] J.W.K.Chan, T.K.L.Tong: *Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: grey relational analysis approach*, Materials & Design, vol.28, n.5, pp.1539-1546 (2007).
- [11] D.Cebon, M.F.Ashby: *Computer-aided materials selection for mechanical design*, Metals and Materials, vol.8, n.1, pp.25-30 (1992).
- [12] H.Breuer, G.Dean, M.H.Tiba, R.Shastri: *International standards for the acquisition and presentation of comparable data on plastics*, J. of Vinyl and Additive Technology, vol.16, n.4, pp.213-218 (1994).
- [13] B.Deaghan-Manshadi, H.Mahmudi, A.Abedian, R.Mahmudi: *A novel method for materials selection in mechanical design: combination of non-linear normalization and a modified digital logic method*, Materials & Design, vol.28, pp.8-15 (2007).
- [14] I.Giovanetti, G.Zonfrillo: *Valutazione delle CTQs e selezione di materiali per impiego ad alta temperatura*, In atti del XXXV Conv. AIAS, D. Amodio ed., Ancona (2006).
- [15] A.Shanian, O.Savado: *A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making*, Materials & Design, vol.27, n.4, pp 29-337 (2006).